



TITLE:

# Small-Scale Statistics and Large-Scale Coherence in Convective Turbulence( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Suzuki, Eri

---

CITATION:

Suzuki, Eri. Small-Scale Statistics and Large-Scale Coherence in Convective Turbulence.  
京都大学, 1997, 博士(理学)

ISSUE DATE:

1997-03-24

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/202424>

RIGHT:

氏 名	鈴 木 絵 理
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 1789 号
学位授与の日付	平 成 9 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 第 一 専 攻
学 位 論 文 題 目	Small-Scale Statistics and Large-Scale Coherence in Convective Turbulence (熱対流乱流における微視的スケールの統計と巨視的秩序)
論文調査委員	(主 査) 教 授 蔵 本 由 紀    教 授 小 貫 明    助 教 授 藤 定 義

## 論 文 内 容 の 要 旨

申請者は、熱対流での発達した乱流状態であるハード乱流に見られる微視的乱れと巨視的秩序の共存状態について、特に微視的な乱れの統計性質に焦点を置き乱流状態の総合的な理解を進めた。

ハード乱流は、これまで知られていた乱流状態(ソフト乱流)と異なり極めて高いレイリー数の実験で観測される熱対流乱流で、分布関数の遷移、ボルギアーノ=オブコフ(BO)スケーリングや巨視的な平均流(セル流あるいは循環流)の存在などで特徴づけられる様々な興味深い現象を内包している。この意味で、熱対流乱流は乱れと秩序が共存する系である。また、流体が箱の中に閉じ込められているという意味で系は閉じており、現象を総合的に理解する事が可能である。申請者の研究を通して、空間2次元系でもこれらの現象が再現できることが示されており、理論研究の対象としても適当な大きさの系であると言える。従って、この系は、乱流揺らぎと巨視的秩序の関連、特に乱流中の秩序形成や秩序のダイナミクスを理解する1つのモデルと考えられる。更に、これまでの乱流の基礎研究がナビエ=ストークス乱流に限られておりその有効性を比較する対象がなかったが、この意味でも熱対流乱流の研究は、乱流のより深い理解のために貢献できるものである。

申請論文は大きく分けて(1)2次元箱のシミュレーション、(2)中央領域のモデル、(3)シェルモデル、の3つの研究からなる。

(1)において、実験に近い境界条件をもつ正方領域内(2次元箱)で、2次元ブシネ近似ナビエ=ストークス方程式系がハード乱流の特性をよく再現することを直接シミュレーションを行うことにより確認した。特に、温度及び速度の2時刻差の分布関数が stretched exponential distribution でよく近似できること、その指数の時間差に対する関係が定性的に実験とよく合うことを示した。また、中央で記録した温度揺らぎのパワースペクトルが3次元の実験のそれによく一致する事を見出した。

申請者は、この2次元箱のシミュレーションを通して、境界層から吹き出される高温(低温)の流体塊(プルーム)が循環流により境界層領域から中央部分に運ばれる過程が基本であることを見出し、乱流

状態に維持された秩序によるプリュームの中央部分への輸送が乱流維持に不可欠であると結論している。

以上のことから、この系を「箱中央領域」と「周りの流れ」の相互作用系としてモデル化するとハード乱流がうまく理解できることを提案した。つまり、境界層を含む周りの流れは中央領域にプリュームの形でエントロピー ( $S \equiv T^2/2$ ) を供給し、中央領域ではこのエントロピーをカスケードにより高波数に運ぶことで乱流が維持されている考える。しかし、マクロな秩序(循環流)の維持機構と、箱中央領域の周りの流れに対する寄与については明らかではない。

申請者はこの問題の解決を目指し(2)の研究を行った。箱中央領域の発達した乱流の性質を調べるために、箱中央領域のモデルである次の自由対流モデルを考案した。箱の中央領域は温度勾配がなく、プリュームの供給を受けている。この状況をモデル化するために、周期的な2次元正方領域内で2次元ブシネ近似方程式を考える。プリュームの役割は低波数域での外力として置き換える。このモデルを直接シミュレーションすることによりBOスケールリングが実現できることを示した。BOスケールリングとは、エントロピーカスケードを仮定したスケールリング則で、慣性領域では、エントロピー及びエネルギースペクトルはそれぞれ  $S \sim k^{-7/5}$ 、 $E \sim k^{-11/5}$  のべき則を満たすものである。さらに、エネルギーが低波数側に輸送される事を示した。これは、熱対流乱流にマクロな秩序を維持する機構が存在することを示唆するものである。また、箱中央領域が周りの流れへの寄与をすることを示唆しており、これが循環流維持に関係していると推測している。

更に2次元ウェーブレットを用いてスケール分解したエントロピーとエネルギーの時系列のスケール間相関を調べ、エントロピーはスケールリング側から予想される時間スケール ( $\tau \sim k^{-2/5}$ ) で小さいスケールに輸送されることを示した。また、輸送関数をウェーブレット空間で表現し、2次元系で熱対流乱流とナビエ=ストークス(NS)乱流を比較することによりエントロピーとエンストロフィーカスケードの質的違いを調べた。エンストロフィーカスケードに比べエントロピーカスケードでは、局所的相互作用が比較的優勢であることを見出した。この結果より、2次元熱対流乱流が3次元NS乱流に近い乱流特性を持つことを示した。

申請者は乱流特性特に間欠性を調べるために、(3)の研究を行っている。シェルモデルは、カスケード過程の漸近的振る舞いを調べるために、波数空間をシェルで分解し隣接するシェル間の相互作用のみを取り込んだ簡単なモデルである。申請者はシェルモデルを自由対流系に対応するように改良し、BOスケールリングがよく再現される事を示した。更に構造関数を用いて時間的な間欠性を調べ、マルチフラクタルモデルの熱対流乱流への拡張を行い両者の比較を行った。3次元乱流シェルモデルの結果と比較すると、時間的な間欠性がマルチフラクタルモデルではうまく説明できないことを示した。この結果は、ナビエ=ストークス乱流に合うように作ったカスケードモデルなどのモデルを熱対流乱流に適応することで、その妥当性の検証になることを示した。

参考論文には、発達した乱流の素過程の候補と考えられている非粘性極限での発散解の存在を調べた論文と乱流特性を2次元ウェーブレットを用いて解析した論文がある。

## 論文審査の結果の要旨

申請者は、熱対流での発達した乱流状態であるハード乱流に見られる微視的乱れと巨視的秩序の共存状態について、特に微視的な乱れの統計的性質に焦点を置き乱流状態の総合的な理解を進めた。

ハード乱流は80年代後半にシカゴ大のグループにより相転位に似た乱流間遷移現象とともに発見され注目を集めた。実験によるハード乱流状態の定義は、(1)箱中心で記録した温度揺らぎの分布関数が指数分布になる。(2)箱中心で記録した温度揺らぎのパワースペクトルが  $k^{-7/5}$  のべき則域を持つ。(3)箱のスケールの安定した循環流が維持される、(4)熱輸送量がレイリー数の  $2/7$  乗でスケールされる、の4つの特徴が満たされることである。この意味では、ハード乱流は乱れと秩序が共存する系であり、また流体が箱の中に閉じ込められているという意味で系は閉じており、現象は総合的に理解されるべき対象である。個々の特徴に対し様々な理論やモデルが提案されたが、立脚する現象の観測が不足しており、また、理解が特徴相互の関係に立ち入ることの無い個別の状況を対象にしているため本質的な理由に至っていなかった。

申請者は、ハード乱流の本質が空間2次系でも実現できることを直接シミュレーション等を用いて明らかにし、この単純化された系を詳細に調べることにより妥当と思われるハード乱流の全体像を描くことに成功している。この描象において、系を「箱中央領域」と「周りの流れ」の二つの領域に分離し相互作用系としてモデル化している。つまり、境界層を含む周りの流れは中央領域にプルームの形で大きなスケールの温度揺らぎ（エントロピー）を供給し、中央領域ではこのエントロピーをカスケードにより高波数に運ぶことで発達した乱流が維持されていると考えるものである。

この描象により箱中央領域を独立した系として扱うことが可能となり、更に単純化した2次元モデルを提案した。このモデルにより、ハード乱流の温度揺らぎのパワースペクトルを説明すると信じられているボルギアーノ=オブコフ（OB）スケーリング則が実現できることを、実験も含めて初めて示した。また、このスケーリング則では決められなかったエネルギーの輸送の向きが大きなスケールに向かうこと、更に浮力の効果がポテンシャルエネルギーを運動エネルギーに変換する向きに働くことを明らかにした。エネルギーの逆輸送は、巨視的秩序形成に発達した乱流が寄与していることを示唆するものであり、乱流揺らぎと巨視的秩序の関連、特に乱流中の秩序形成や秩序のダイナミクスを理解する1つのモデルを与えている。従来の乱流の基礎研究がナビエ=ストークス乱流に限られておりその有効性を比較する対象がなかったが、この意味でも申請者の熱対流乱流に関する研究は、乱流のより深い理解のために大きく貢献するものである。

申請者は、発達した乱流を研究する上で有効な手段と考えられているウェーブレットを用いた解析にも積極的に取り組んでいる。特に、乱流カスケード過程の素過程を調べるために2次元ウェーブレットを用い、エントロピー輸送の時間スケールがBOスケーリングで説明出来ることや、2次元熱対流乱流系が3次元ナビエ=ストークス乱流に良く似た乱流特性を持つことを明らかにした。これは、2次元ナビエ=ストークス乱流が3次元ナビエ=ストークス乱流と非常に異なる乱流特性をもつことを考えると驚くべき結果である。これにより、2次元熱対流系がより発達した乱流状態を調べるために低コストのモデルとして使えることが示され、乱流研究をより容易にする方向に導くものと期待できる。

申請者は乱流特性に間欠性を調べるために、2次元熱対流系を簡略化したシェルモデルを用いて、BOスケーリングがよく再現される事を示した。更に構造関数を用いて時間的な間欠性を調べ、マルチフラクタルモデルの熱対流乱流への拡張を行い両者の比較を行った。これらの研究は、実験においても詳しく調べられていない熱対流乱流の間欠性研究の先鞭となるものである。更に、3次元ナビエ=ストークス乱流シェルモデルを熱対流乱流シェルモデルの結果と比較することにより、時間的な間欠性がマルチフラクタルモデルではうまく説明できないことを示した。この結果、ナビエ=ストークス乱流の間欠性モデルを熱対流乱流に適用することで、その妥当性の検証になり得ることを示した。

申請論文は、熱対流乱流の理解に留まらず、乱流における巨視的秩序と微視的乱れが共存する系を理解するための重要な手がかりを与えるものである。また、「乱流とは？」という物理学の積年の問題の解決に大きな貢献をするものと期待できる。よって、本論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認める。

なお、主論文及び参考論文に報告されている研究業績を中心とし、これらに関する研究分野について試問した結果、合格と認めた。